



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

광대역 완전 광 흡수를 위한  
다층박막의 나노 구조체 구현

Implementation of Multilayered  
Nano-structure for Broadband Perfect  
Light Absorption

2017년 8월

서울대학교 대학원

전기정보공학부

조 현 우

# 광대역 완전 광 흡수를 위한 다층박막의 나노 구조체 구현

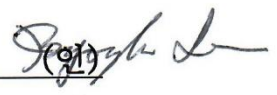


Implementation of Multilayered  
Nano-structure for Broadband Perfect  
Light Absorption

지도 교수 박 남 규

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함  
2017년 8월

서울대학교 대학원  
전기정보공학부  
조 현 우

조현우의 공학석사 학위논문을 인준함  
2017년 8월

위 원 장 李 竝 浩 (인)   
부위원장 朴 南 奎 (인)   
위 원 鄭 潤 榮 (인) 

# 초 록

완전 광 흡수체는 입사된 빛의 투과와 반사를 억제하여 이론적으로 빛을 100% 흡수하는 구조체로서 태양전지, 선택적 열 방출기, 센서 및 검출기 등에서의 활용 가능성으로 인해 많은 주목을 받아 왔다. 초기에는 표면 플라즈몬 폴라리톤과의 결합, 도파로 모드, 흡수 물질을 포함한 공동 등을 이용한 공진기 기반의 완전 광 흡수체들이 많이 제안되었으나 좁은 주파수의 흡수 대역폭을 갖는 단점을 피할 수 없었다. 그러나 최근에 제안된 메타물질 기반의 완전 광 흡수체는 주기적 배열을 통해 자연계에 존재하지 않는 광학적 특성을 구현하므로, 구조 변수의 제어를 통하여 광대역의 광 흡수 폭을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 광대역에서 편광 방향에 무관한 완전 광 흡수체로써 원뿔 형태의 쌍곡 메타물질 구조체를 제안하고 이를 구현하였다. 쌍곡 메타물질은 방향에 따라 금속과 유전체의 특성을 각각 지니며 이에 따른 특이적 고유모드에 의해 특정 주파수에서 느린 빛 모드를 갖는다. 이를 원뿔 형태로 설계함으로써 느린 빛 모드를 형성하는 주파수 대역폭을 확장하여 광대역의 흡수폭을 얻을 수 있다. 이러한 원뿔 형태의 3차원 구조를 구현하기 위해 집속이온빔장치를 이용하여 패터를 형성하였는데, 그레이스케일 이미지를 이용해 빔의 체류 시간을 세분화하여 이를 구현하였다.

**주요어 :** 완전 광 흡수체, 집속이온빔장치

**학 번 :** 2015-22811

# 목 차

|   |     |
|---|-----|
| 초록 .....  | i   |
| 목차 .....  | ii  |
| 그림 목차 .....   | iii |
| 제 1 장 서 론 .....   | 1   |
| 1.1 연구의 배경 .....  | 1   |
| 1.2 연구의 목적 .....  | 7   |
| 1.3 논문의 구성 .....  | 8   |
| 제 2 장 배경 이론 .....   | 9   |
| 2.1 쌍곡 메타물질 .....   | 9   |
| 2.2 느린 빛 모드 .....   | 12  |
| 2.3 피라미드 구조의 광대역 광 흡수 .....                                   | 13  |
| 2.3.1 쌍곡 메타물질에서의 느린 빛 모드 .....                                | 13  |
| 2.3.2 2차원 톱날 구조의 광대역 광 흡수 .....                               | 15  |
| 2.4 집속이온빔장치 .....   | 16  |
| 2.4.1 전하 중화제 (Charge Neutralizer) .....                       | 17  |
| 2.4.2 집속이온빔의 체류 시간 (Dwell time) 세분화 .....                     | 22  |
| 제 3 장 결과와 해석 .....  | 24  |
| 3.1 원뿔형 완전 광 흡수체의 구조 및 특성 .....                               | 24  |
| 3.1.1 구조 및 개요 .....   | 24  |
| 3.1.2 광 흡수율의 수치해석 .....                                       | 25  |
| 3.2 원뿔형 완전 광 흡수체 제작 .....                                     | 30  |
| 3.2.1 다층박막구조 .....  | 31  |
| 3.2.2 전하 중화제와 그레이스케일 (Grayscale) 이미지를<br>활용한 원뿔 형 구조 제작 ..... | 33  |
| 3.2.3 공정 결과 .....   | 37  |
| 제 4 장 결론 .....  | 42  |
| 참고문헌 .....  | 43  |
| Abstract .....  | 46  |

# 그림 목차

|  |    |
|--|----|
| [그림 1.1] 임피던스 매칭과 금속 내의 광 손실 이용한 광 흡수체 .....   | 2  |
| [그림 1.2] SRR을 이용한 완전 광 흡수체 .....   | 3  |
| [그림 1.3] 그물망 구조의 완전 광 흡수체 .....  | 3  |
| [그림 1.4] 완전 광 흡수체의 응용 .....  | 5  |
| [그림 2.1] 쌍곡 메타물질 모식도 .....   | 10 |
| [그림 2.2] 쌍곡 메타물질의 등주파수곡면 .....   | 11 |
| [그림 2.3] 쌍곡 메타물질 도파로 .....   | 13 |
| [그림 2.4] 쌍곡 메타물질 도파로의 분산 관계 및 군속도 .....  | 14 |
| [그림 2.5] 튜널 구조의 광대역 광 흡수체 .....  | 15 |
| [그림 2.6] 금속(금)으로 증착되어 전기적 전도가 가능한 부분을<br>집속이온빔장치를 이용하여 차단한 예시 .....                      | 16 |
| [그림 2.7] 이온 빔이 굴절되는 드리프트 효과의 모식도 .....   | 17 |
| [그림 2.8] 밀링이 실패 되는 드리프트 효과의 예시 .....   | 18 |
| [그림 2.9] 1cm x 1cm Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 웨이퍼(점선)를 카본 테이프(검<br>정색)로 접지한 시료 ..... | 19 |
| [그림 2.10] 전도성 물질을 이용한 드리프트 효과 보완 모식도   | 20 |
| [그림 2.11] 전하 중화제를 이용한 드리프트 효과 보완 모식도   | 21 |
| [그림 2.12] 전하 중화제를 이용하여 드리프트 효과를 보완한<br>예시 .....  | 22 |
| [그림 2.13] 집중이온빔장치에 그레이스케일을 활용하여 제작한<br>예시 .....  | 23 |
| [그림 3.1] 원뿔형 완전 광 흡수체 모식도 .....  | 24 |
| [그림 3.2] 원뿔형 다층박막 구조체의 광 흡수 스펙트럼 .....   | 26 |
| [그림 3.3] 파장 변화에 따른 자기장 세기 분포 (a)400nm<br>(b)600nm (c)800nm .....                         | 27 |

|  |    |
|--|----|
| [그림 3.4] (a) Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 다층 박막 구조의 유효 유전율 (b) 다층 박막 도파로의 폭 길이 변화에 따른 분산 관계 | 28 |
| [그림 3.5] 원뿔 지름 길이 변화에 따른 광 흡수 스펙트럼   | 29 |
| [그림 3.6] 다층박막의 원뿔형 완전 광 흡수체 구현을 위한 단계별 모식도   | 30 |
| [그림 3.7] 실리콘(Si) 웨이퍼 위에 증착된 금(Au) 반사판과 6쌍의 유전체(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/금속(Al) 박막        | 31 |
| [그림 3.8] 실리콘(Si) 웨이퍼 위에 증착된 금(Au) 반사판과 10쌍의 유전체(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/금속(Al) 박막       | 32 |
| [그림 3.9] 원뿔 구조와 일치하는 그레이스케일 이미지  | 33 |
| [그림 3.10] 전하 중화제를 활성화 하지 않고 집속이온빔장치를 통해 구현된 원뿔 구조  | 34 |
| [그림 3.11] 원뿔 구조와 일치하는 그레이스케일 이미지를 활용한 밀링   | 35 |
| [그림 3.12] 원뿔 중심부의 이온 빔 체류시간을 줄이는 그레이스케일 이미지  | 35 |
| [그림 3.13] 원뿔 중심부의 이온 빔 체류시간을 줄이는 그레이스케일 이미지를 활용한 밀링  | 36 |
| [그림 3.14] 이온 빔 체류시간을 연속적으로 설계하고 대면적 구현을 위한 퍼즐형 그레이스케일 이미지  | 36 |
| [그림 3.15] 퍼즐형 그레이스케일 이미지를 활용한 밀링   | 37 |
| [그림 3.16] 순차적 밀링 시 잔여 물질에 의해 비대해진 경계의 원뿔   | 38 |
| [그림 3.17] 특정 개수 이상의 구조물이 단일 격자에 포함되어 발생하는 해상도의 저하와 밀링의 부정확성                                      | 38 |
| [그림 3.18] (a) 최적화된 8 x 8 개의 원뿔 단위 격자 그레이스케일 이미지 (b) 상응하는 집속이온빔 밀링 결과 (c) 확대 이미지                  | 39 |

|  |    |
|--|----|
| [그림 3.19] 제작된 구조의 수치해석 결과 .....  | 40 |
| [그림 3.20] 8 x 8 개의 원뿔 단위 격자 9개를 구현 후 수직으<br>로부터 (a)40° (b)0° 에서 촬영한 SEM 이미지. | 41 |



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구의 배경

완전 광 흡수체는 입사된 빛의 투과와 반사를 모두 억제하여 입사파의 에너지를 모두 열 에너지 등으로 흡수시키는 구조체이다. 얇은 두께의 광 흡수체를 구현하는 기술은 레이더 기술이 도입되던 시기부터 지속적으로 관심을 받아 왔으나 완전 광 흡수가 저주파수에서만 구현 가능하며 대역폭이 좁다는 한계점이 있었다[1, 2]. 그러나 최근 진행되어 온 나노 광학과 나노 공정 기술의 발전으로 기존의 마이크로파 영역에서 구현된 완전 광 흡수체는 테라 헤르츠, 근적외선, 가시광 주파수 영역으로 확장되어 왔다[3-8].

완전 광 흡수체의 기본 원리는 임피던스 매칭을 통해 반사를 최소화하고 금속 내의 광 손실을 이용하여 투과 억제하는 것이다. 그림 1.1은 초기에 제안된 완전 광 흡수체의 한 예시로서, 유전체 박막을 통해 반사를 억제하고 투과된 빛을 공동 내에서의 광 손실을 이용하여 흡수하는 구조체이다[9]. 유전체 박막을 투과한 빛은 Fabry-Perot 공진기와 공진을 일으키며 금속 내에서의 광 손실에 의해 흡수가 발생하게 된다. 하지만 유전체 막을 통한 반사 억제와 투과파의 공진 모드는 특정 주파수에서 발생하기 때문에 광대역의 흡수를 얻을 수 없으며, 흡수율이 낮다는 한계점이 존재했다.

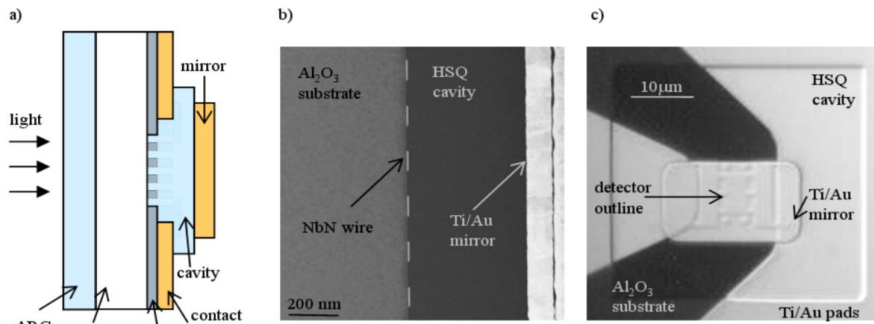


그림 1.1 임피던스 매칭과 금속 내의 광 손실을 이용한 광 흡수체

이후 메타물질의 개념이 등장하면서 이를 활용한 완전 광 흡수체가 새롭게 조명 받았다. 광학적 메타물질이란 파장 이하의 주기적 배열을 통해 자연계에 존재하지 않는 전기적 혹은 자기적 물성을 갖는 구조로써 이를 통해 음굴절률, 고굴절률, 회절한계 이하 이미징 등의 구현이 가능하다. 광학적 메타물질 중 하나인 SRR(Split Ring Resonator)의 경우 회로 전류에 의한 자기적 공명을 이용하는 구조체로써 자기적 광 특성인 투과율을 인위적으로 제어할 수 있음이 알려져 있다[10]. 이러한 구조적 자기 공진 현상을 이용하면 공진 주파수에서 완전 광 흡수가 나타남이 밝혀졌으며, SRR 기반의 다양한 완전 광 흡수체가 테라 헤르츠와 적외선 대역에서 구현된 바 있다 [11–13].

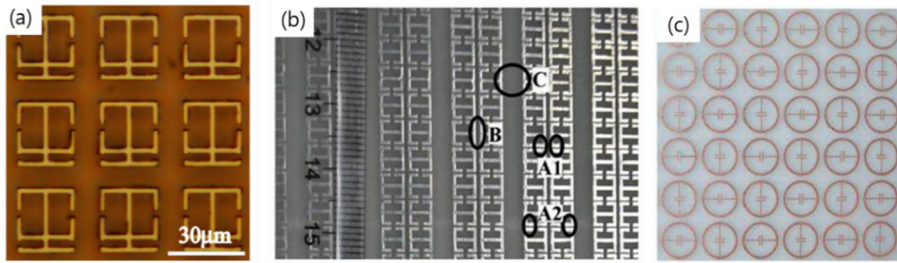


그림 1.2 SRR을 이용한 완전 광 흡수체

위와 유사하게 메타물질을 이용하여 구현된 완전 광 흡수체로서 그물망 구조가 있다. 그물망 구조 혹은 역 그물망 구조에서는 금속/ 유전체/금속 층이 갖는 고유 모드에 의한 자기적 공진으로 인해 특정 주파수에서 완전 광 흡수 현상이 나타난다. 이와 같은 그물망 구조 기반의 완전 광 흡수체가 테라헤르츠 영역에서 가시광선 영역까지 제작되었다[2, 7, 14].

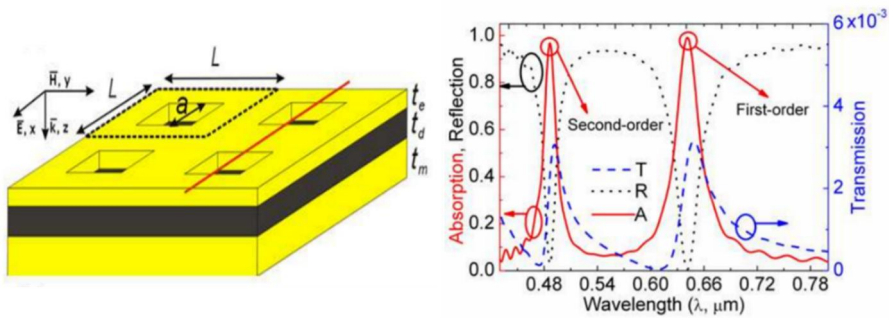


그림 1.3 그물망 구조의 완전 광 흡수체

그러나 앞서 제안된 SRR 구조와 그물망 구조의 경우 완전 광 흡수 대역폭이 좁기 때문에 완전 광 흡수를 응용함에 있어 여러 한계점을 지니고 있다. 이를 극복하기 위한 방안으로써 연속적인 공진 주파수를 갖는 톱날 형태의 구조체가 제안되었다[15]. 금속과 유전체를 반복적으로 쌓은 구조는 수평 방향의 폭에 따라 공진 주파수가 변하는데 이를 톱날 형태로 설계하면 연속적인 공진 주파수를 얻을 수 있다. 이러한 금속-유전체 다층박막 구조의 공진 현상은 쌍곡 메타물질로써 해석될 수 있으며, 쌍곡 메타물질 내에서는 일반적인 매질과 다른 형태의 특이적 고유 모드가 존재하게 된다. 특히 특정 주파수에서 고유 모드의 군속도가 0에 가까워지는 느린 빛 (Slow light) 현상이 나타나며, 이러한 느린 빛 현상을 이용하면 입사된 빛의 체류 시간을 늘림으로써 완전 광 흡수체를 구현할 수 있음이 밝혀졌다[16]. 나아가 위의 구조를 톱날 형태로 설계하여 주파수에 따라 서로 다른 위치에서 공진을 발생시킴으로써 광대역에서 완전 광 흡수 현상이 나타남이 실험적으로 입증되었다[17].

이러한 나노 크기 패턴의 다층박막 구조를 제작하기 위하여 인쇄(lithography)기술이 많이 활용 되었는데 이는 Optical Lithography, Electron Beam Lithography, X-ray Lithography, Ion Beam Lithography 등으로 구분할 수 있다. Optical Lithography를 이용하여 나노 크기의 패턴을 제작할 경우 광원 파장의 한계에

부딪치게 되어 요구되는 나노 크기 패턴의 공정에 여러 가지 문제를 야기 시킨다. X-ray Lithography의 경우 등배투영을 위한 membrane 마스크 제작이 어렵고 Synchrotron 시설을 필요로 하며, Electron Beam Lithography 와 Ion Beam Lithography는 대면적 노광시 균일성과 효율의 문제점이 자리하고 있다. 집속이온빔장치 (FIB: Focused Ion Beam)를 이용한 나노 공정의 경우 물리적인 마스크와 감광제의 불 필요성, 패턴의 실시간 측정 가능성, 이온 빔의 체류 시간 세분화, 영역 선택적 공정 유연성 등의 장점으로 인하여 소규모 후처리 또는 프로토타입 제작에 적합하기 때문에 최근 이를 이용하여 나노 구조를 제작하는 많은 연구들이 진행 중이다[18–20].

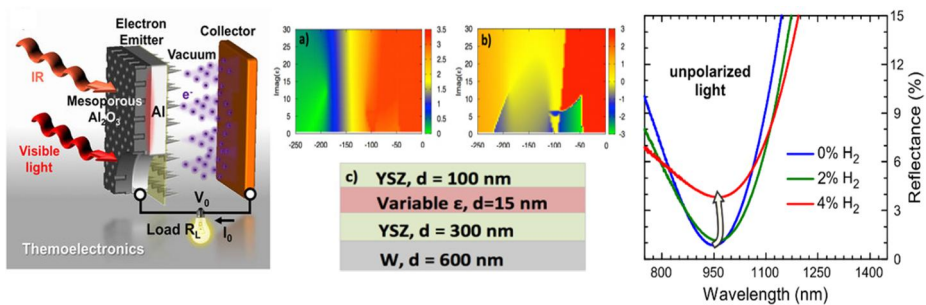


그림 1.4 완전 광 흡수체의 응용

완전 광 흡수체를 응용할 수 있는 분야로는 태양전지[21–23], 선택적 열 방출기[24–26] 및 센서[5, 27, 28] 등이 있다. 대표적으로, 태양전지의 성능 지표가 되는 에너지 변환 효율을 높이기 위해 태양전지의 광 흡수 대역에서 작동하는 광대역 완전 광

흡수체를 결합하는 연구가 진행되어 왔다. 한편, 일반적인 흑체 복사의 열 방출 스펙트럼과 달리 좁은 주파수 영역에서 선택적으로 열을 방출하는 선택적 열 방출기의 필요성이 대두되어 왔는데, 메타물질 기반 완전 광 흡수체를 통해 이 같은 선택적 열 방출기가 구현될 수 있음이 밝혀졌다. 또한, 완전 광 흡수체를 대면적으로 구현할 경우 기체 검출 및 센서 등에 활용될 수 있다.

## 1.2 연구의 목적

완전 광 흡수체란 임피던스 매칭을 통한 반사와 억제와 금속 내의 광 손실을 통한 투과 억제를 통해 완전한 광 흡수를 구현하는 구조체이다. 이러한 완전 광 흡수 구조체로써 금속-유전체 층이 반복되는 피라미드 형태가 제안되었으며, 이 구조에서는 쌍곡 메타물질이 갖는 느린 빛 모드를 이용하여 광대역의 완전 광 흡수체를 구현할 수 있음이 밝혀져 있다. 그러나 현재 나노 공정 기술의 한계상 피라미드 구조 등 기울기를 갖는 나노 크기 패턴을 제작하는 것에 제약이 있다. 본 연구의 목표는 집속이온빔장치에서 그레이스케일 (Grayscale) 이미지를 활용하여 구조체의 기울기를 제어함으로써 완전 광 흡수 현상을 구현하는 원뿔형 나노 구조체를 제작하는 것이다. 이를 통해 태양전지, 선택적 열 방출기, 센서 또는 검출기 등에 활용할 수 있다.

## 1.3 논문의 구성

제 2장에서는 다층박막 구조의 완전 광 흡수 현상의 해석에 사용되는 쌍곡 메타물질과 느린 빛 모드에 대해 설명하고 이를 통한 광대역 광 흡수의 원리를 설명하였다. 또한 구조체 제작에 활용된 집속이온빔장치의 주요 기능에 대해 소개하였다. 제 3장에서는 원뿔형 다층박막 구조체의 광 흡수 특성에 대한 수치해석 결과를 분석하고 제작 과정을 기술하였다. 제 4장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.



## 제 2 장 배경 이론

### 2.1 쌍곡 메타물질

메타물질이란 파장 이하 크기의 규칙적 배열을 통해 자연계에서 나타나지 않는 특성을 구현하는 구조체이다. 광학적 메타물질은 자연의 물질이 가지고 있는 광학적 특성의 영역을 확장함으로써 음굴절률, 회절 한계 극복, 산란 제어 구조체 등으로 활용되어 왔다. 이러한 광학적 메타물질 중 특이적 성질을 갖는 구조로 쌍곡 메타물질이 있다. 이것은 주로 금속과 유전체가 반복되는 다층박막 구조로 구현되며, 방향에 따라 금속 또는 유전체의 특성을 나타낸다. 이에 따라 쌍곡면 형태의 등주파수곡면 (Iso Frequency Surface)이 나타나며 쌍곡 메타물질의 광학 상태밀도 (Photonic Density of State)는 특이점을 갖게 된다. 금속과 유전체의 유전율을 각각  $\epsilon_m, \epsilon_d$  라 하고 박막의 두께를 각각  $t_m, t_d$  라 하면 유효 매질 이론에 의해 유효 유전율이 각각 다음과 같이 나타난다.

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \frac{t_m \epsilon_m + t_d \epsilon_d}{t_m + t_d} \quad \epsilon_{zz}^{-1} = \frac{t_m \epsilon_m^{-1} + t_d \epsilon_d^{-1}}{t_m + t_d} \quad (1)$$

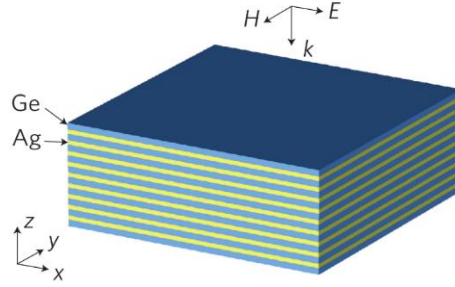


그림 2.1 쌍곡 메타물질 모식도

비등방성 유전율을 갖는 매질에서의 고유 모드는  $\exp(-j\omega t)$ 의 시간 의존성을 갖는 Maxwell 방정식을 이용하여 구할 수 있다. Maxwell 방정식을 행렬 방정식 형태로 나타내면 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} k_0^2 \varepsilon_{xx} - k_y^2 - k_z^2 & k_x k_y & k_x k_z \\ k_x k_y & k_0^2 \varepsilon_{yy} - k_x^2 - k_z^2 & k_y k_z \\ k_x k_z & k_y k_z & k_0^2 \varepsilon_{zz} - k_x^2 - k_y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

이를 이용하여 동일한 주파수에서 나타나는 고유모드들의 파수 벡터들을 역격자 공간 (reciprocal space)에 나타낸 곡면을 등주파수곡면이라 하는데, 이 평행 방향과 수직 방향 유효 유전율의 부호가 다를 경우 등진동주곡면이 쌍곡면 형태를 갖게 된다.

$$(k_{\perp}^2 + k_z^2 - \varepsilon_{\perp} k_0^2) \left( \frac{k_{\perp}^2}{\varepsilon_{zz}} + \frac{k_z^2}{\varepsilon_{\perp}} - k_0^2 \right) = 0 \quad (3)$$

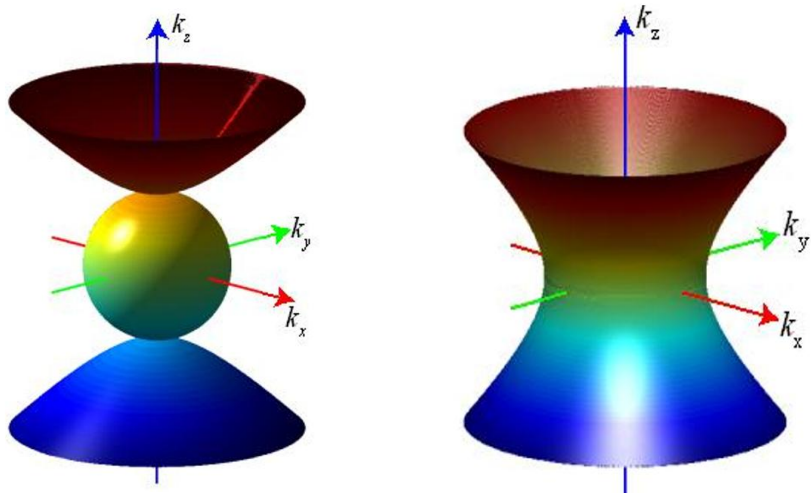


그림 2.2 쌍곡 메타물질의 등주파수곡면

## 2.2 느린 빛 모드

파동의 진행속도는 위상의 진행 속도를 나타내는 위상속도와 에너지의 전달 속도를 나타내는 군속도로 구분할 수 있다. 일반적인 등방적 매질에서는 위상속도와 군속도가 동일하나, 비등방적 매질의 경우 군속도와 위상속도의 차이가 생길 수 있다. 특히 특이적 분산 관계를 갖도록 설계된 쌍곡메타물질 내에서는 군속도가 0에 가까운 고유 모드가 나타날 수 있는데, 이를 느린 빛(Slow Light) 모드라 한다.

분산 관계에서의 기울기가 군속도를 의미하며, 느린 빛 모드를 구현 하기 위해서는 좁은 주파수 대역에서 높은 분산성을 갖는 것이 필요하다. 군속도를 0에 가깝도록 설계하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 매질 내의 분산을 이용하는 방법과 도파로(Waveguide)의 분산을 이용하는 방법이 있다. 매질 내 분산을 이용하기 위해서는 굴절률이 주파수에 크게 의존하도록 비선형 효과 등을 이용한다. 도파로를 이용한 느린 빛 모드에서는 photonic crystal, 음굴절률 메타물질 등에서의 spatial  $k$ -vector를 통해 느린 빛 모드를 구현한다[29].

## 2.3 피라미드 구조의 광대역 광 흡수

### 2.3.1 쌍곡 메타물질 도파로의 느린 빛 모드

쌍곡 메타물질 내부에서는 쌍곡면 형태의 등주파수곡면으로 표현되는 특이적 고유 모드로 인해 음의 군속도를 갖게 된다[16]. 이를 이용하여 설계된 도파로의 경우, 그 폭이 유한하기 때문에 둘러싼 매질의 모드와의 결합이 일어나고 그 결과 TM 모드에서 군속도가 0에 가까운 느린 빛 모드가 나타난다[30].

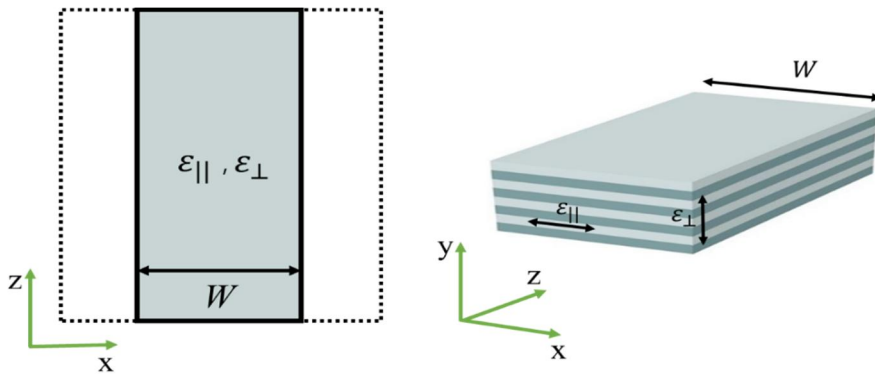


그림 2.3 쌍곡 메타물질 도파로

쌍곡 메타물질 도파로 내의 고유 모드를 구하고 자유 공간 고유 모드와의 경계 조건을 사용하면 분산 관계를 얻을 수 있다. 나아가, 분산 관계에서 파수에 대한 주파수의 변화율을 구하여

군속도를 계산할 수 있다. 도파로 모드의 진행 방향 파수  $\beta$ 와 주파수  $\omega$ 에 대해 분산 관계식을 나타내면 다음의 식과 같다[15]. 그림 2.4는 분산 관계와 군속도를 각각 그래프로 나타낸 것이다. 도파로의 폭이 넓을수록 긴 파장에서 느린 빛 모드가 나타남을 확인할 수 있다.

$$\exp[iq_2W] + \frac{\frac{\kappa_1}{n_0^2} - i\frac{q_2}{\varepsilon_\perp}}{\frac{\kappa_1}{n_0^2} + i\frac{q_2}{\varepsilon_\perp}} = 0 \quad (4)$$

$$\kappa_1 = (\beta^2 - n_0^2\omega_c^2)^{1/2}, \quad q_2 = (\varepsilon_\perp\omega_c^2 - (\varepsilon_\perp/\varepsilon_\parallel)\beta^2)^{1/2} \quad (5)$$

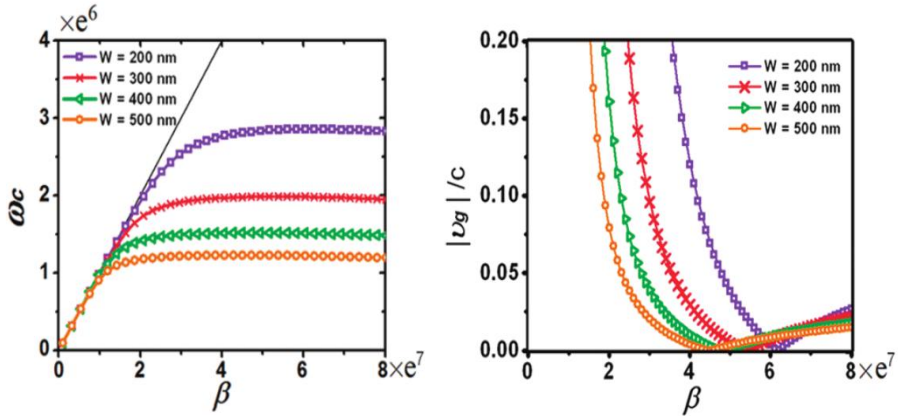


그림 2.4 쌍곡 메타물질 도파로의 분산 관계 및 군속도

### 2.3.2 2차원 톱날 구조의 광대역 광 흡수

쌍곡 메타물질 도파로에서 나타나는 느린 빛 모드를 이용하면 특정 주파수에서 완전 광 흡수를 구현할 수 있다. 이 때, 광 흡수 주파수는 도파로의 폭에 의해 결정되며 폭이 넓을수록 낮은 주파수에서 광 흡수가 발생한다. 이를 활용하여 도파로의 폭을 점진적으로 변화시킴으로써 연속적인 주파수 영역에서 완전 광 흡수를 일으키는 구조가 제안되었다[15]. 그림 2.5는 2차원의 쌍곡 메타물질 기반 완전 광 흡수체의 모식도이다. 이와 같이 톱날 형태의 쌍곡 메타물질 나노 구조체를 제작하여 적외선 영역에서 광대역의 완전 광 흡수체가 구현된 바 있다.

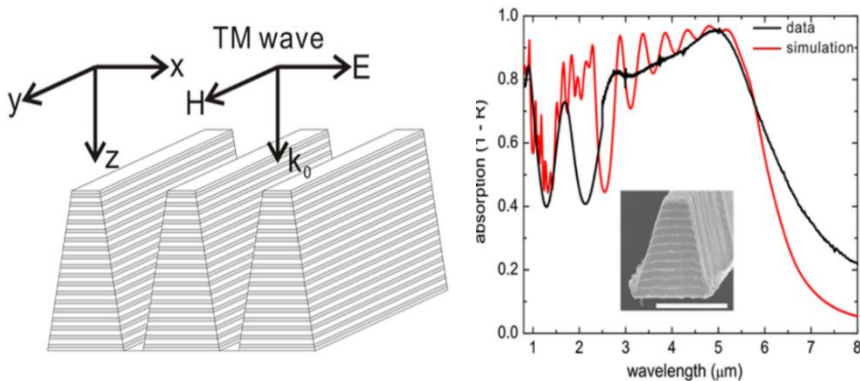


그림 2.5 톱날 구조의 광대역 광 흡수체

## 2.4 집속이온빔장치

현대 집속이온빔장치의 기술은 도체 및 절연체의 고정밀 밀링이 가능하기 때문에 반도체 연구 및 처리 환경, 고장 분석, 장치 수정, 마스크 수리, Transmission electron microscopy (TEM) 시료 제작 등에서 널리 이용되고 있다[18–20, 31]. 집속이온빔장치는 높은 이온 전류 빔을 주사하여 샘플 물질을 제거하는 밀링(Milling)이 가능하다[32]. 시료에 빔을 주사함으로써, 임의의 형상을 제작할 수 있다. 대개 Gallium 이온을 이용하며, 빔의 크기는 10nm 이하이다[33]. 그림 2.6은 연결되어 있는 금속 도체가 직사각형으로 밀링되어 전기적 연결이 차단된 일반적인 예시이다.



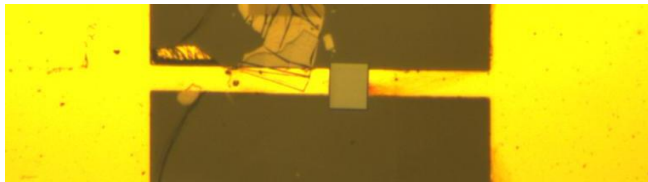


그림 2.6 금속(금)으로 증착되어 전기적 전도가 가능한 부분을 집속이온빔장치를 이용하여 차단한 예시

본 논문에서는 집속이온빔장치의 기능 중에서 전하 중화제[34]와 빔의 체류 시간을 세분화 할 수 있는 그레이스케일[35] 이미지를 중점적으로 이용하여 다층박막의 원뿔 반복 구조를 구현하였다.

#### 2.4.1 전하 중화제 (Charge Neutralizer)

집속이온빔장치는 이온 빔을 원하는 영역에 주사할 수 있지만, 시료가 비전도성의 유전체인 경우, 이온 전하의 축적이 발생하여 그림 2.7과 같이 이온 빔이 굴절되는 드리프트(Drift) 현상이

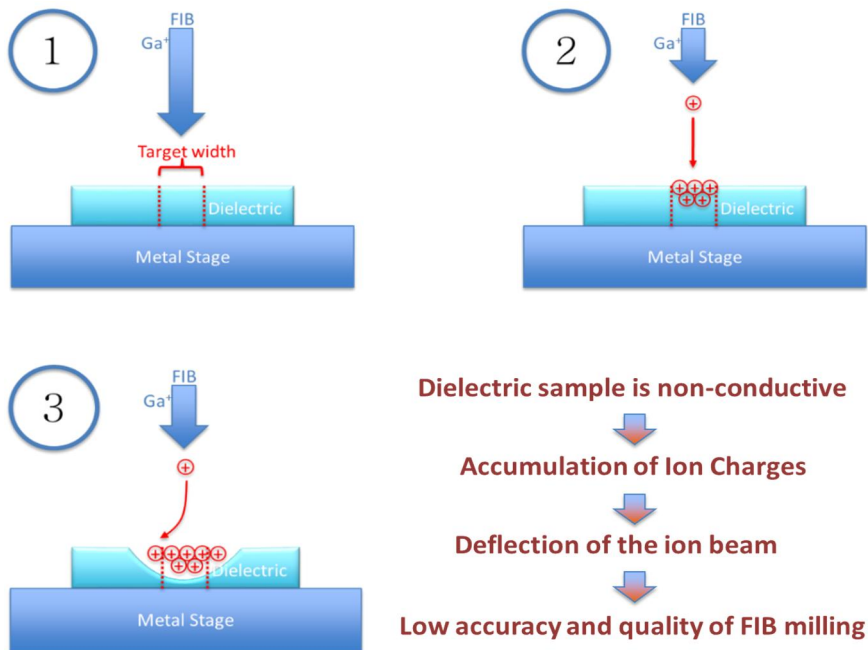
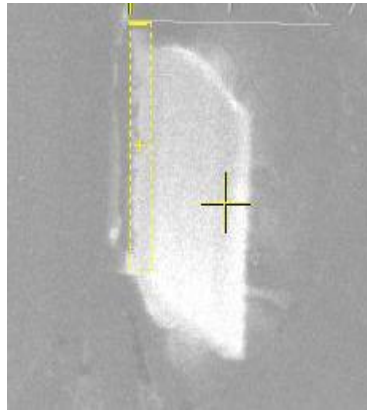


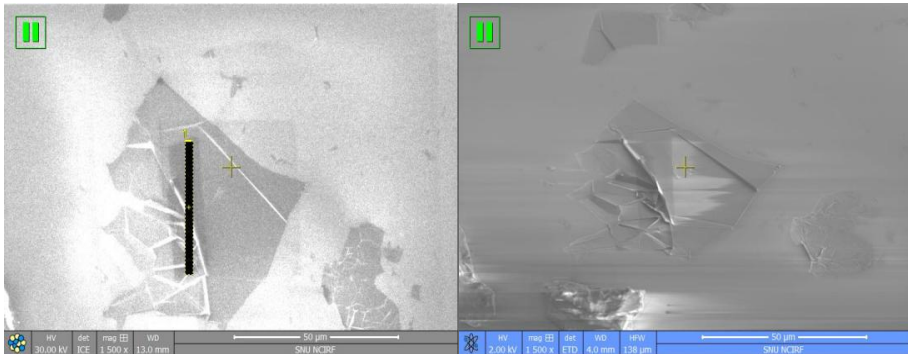
그림 2.7 이온 빔이 굴절되는 드리프트 효과의 모식도

발생하게 된다.

드리프트 효과가 발생하게 되면 이온 빔 밀링 시에 정확도가 감소하고 원하는 영역의 밀링이 불가능하다. 그림 2.8은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 웨이퍼 위에 Graphite를 임의대로 옮긴 후 직사각형 모양의 목표 영역(점선)을 설정하고 밀링을 시도하였으나 빔이 (a)오른쪽 아래 또는 (b) 오른쪽으로 빔이 벗어나면서 다른 영역으로 밀링이 확대되는 현상을 보이고 있다.



(a)



(b)

그림 2.8 밀링이 실패 되는 드리프트 효과의 예시

이러한 단점을 보완하기 위하여 재료를 전도성 박막으로 코팅하거나 전도성 물질(대개 카본 테이프)을 재료에 부착하여 이온 빔 밀링을 실시하게 되는데[36], 이러한 경우 전도성 물질을 통한 이온 전하의 해방을 도울 수 있다. 하지만 이 경우에도 전도성 물질에 의한 완벽한 보완이 이루어 지지 않기 때문에 초정밀 밀링이 필요한 경우에는 부적합한 방법이며, 전도성 물질로 코팅이 어려운

경우에는 적용할 수 없는 방법이다. 그림 2.9는 이를 실제로 응용하여 1cm x 1cm  $\text{Al}_2\text{O}_3$  웨이퍼를 카본 테이프로 접지한 시료의 모습이며 그림 2.10은 전도성 물질을 이용해 드리프트 효과를 보완하는 과정을 모식도로 나타내고 있다.

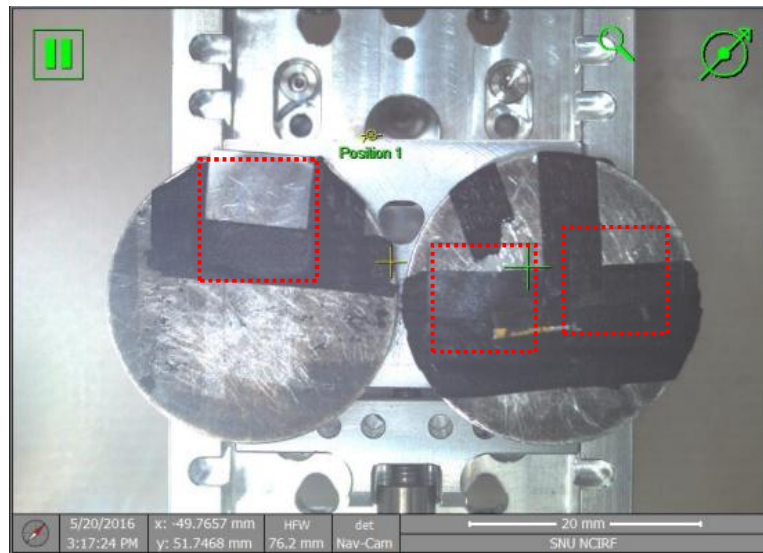


그림 2.9 1cm x 1cm  $\text{Al}_2\text{O}_3$  웨이퍼(점선)를 카본 테이프(검정색)로 접지한 시료

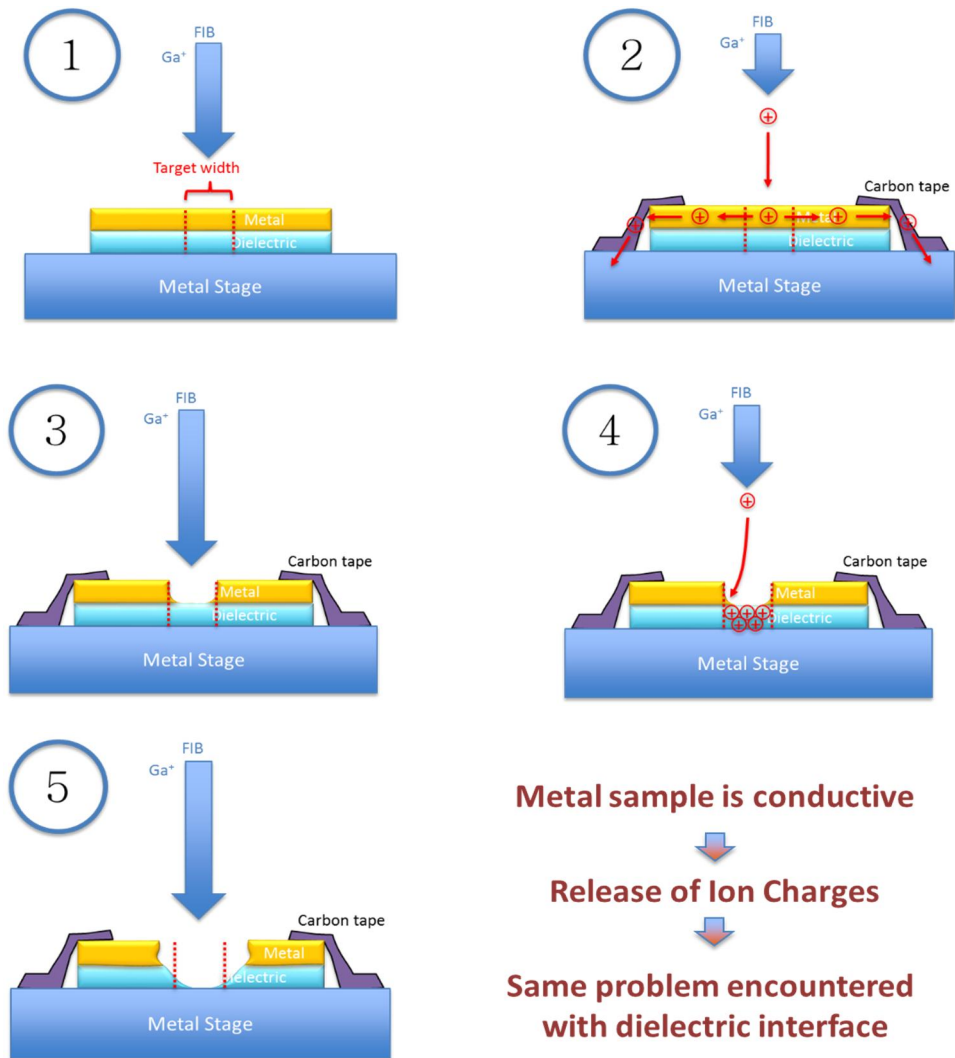


그림 2.10 전도성 물질을 이용한 드리프트 효과 보완 모식도

전하 중화제는 이온 빔을 주사할 때 적정량의 전자 빔을 동시에 주사하여 축적된 이온 전하를 흡수하고 제거하게 된다[37]. 그림 2.11은 전하 중화제를 이용하여 드리프트 효과가 어떻게 보완되는지를 나타내고 있다.

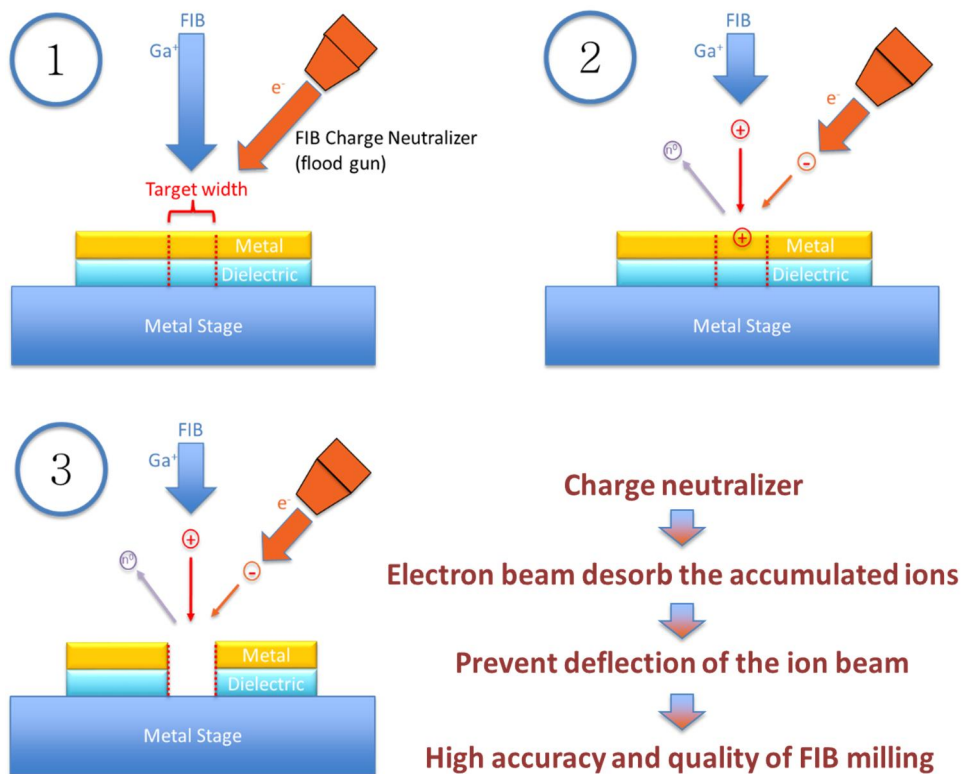


그림 2.11 전하 중화제를 이용한 드리프트 효과 보완 모식도

이러한 경우 이온 빔의 굴절을 방지할 수 있으며, 높은 정확도를 가지고 원하는 영역의 밀링이 가능해진다. 하지만 주사되는 전자의 에너지를 적정 수치로 조정해야 하며, 그렇지 못할 경우 이온 빔의 드리프트 효과를 보완할 수 없거나 밀링이 계획대로 실시되지 않을 수 있다. 그림 2.12는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 웨이퍼 위에 Graphite를 임의대로 옮긴 후 직사각형 모양의 목표 영역(점선) 4곳을 설정하고 전하 중화제를 이용하여 밀링을 시도 하였을 때 빔의 드리프트

현상을 보완하면서 목표 영역만 밀링된 것을 확인할 수 있다. 같은 시료를 이용 하였던 그림 2.8의 결과와는 확연히 구별이 되며 밀링의 정확도나 질이 훨씬 더 향상 되었음을 확인 할 수 있다.

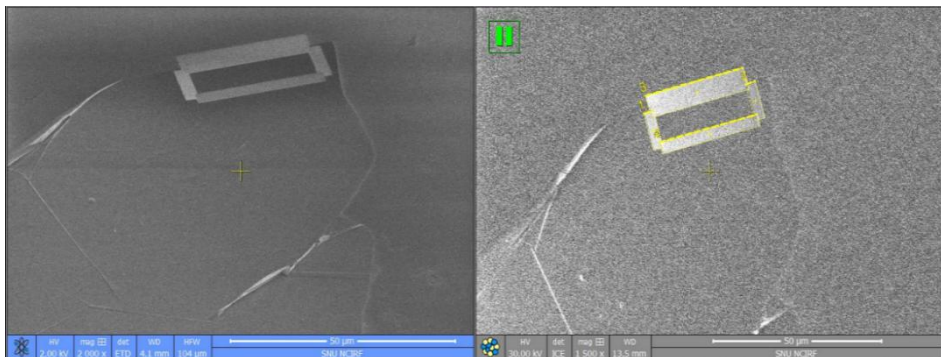


그림 2.12 전하 중화제를 이용하여 드리프트 효과를 보완한 예시

#### 2.4.2 집속이온빔의 체류 시간(Dwell time) 세분화

특정 집속이온빔장치는 그레이스케일(Grayscale)로 제작된 비트맵(Bitmap) 이미지를 읽어 들이고, 음영의 차이에 따라 빔의 체류 시간을 다르게 하여 이온 빔을 주사할 수 있다. 그림 2.13(a)는 그레이스케일 패턴을 비트맵 파일로 제작한 것이고 그림 2.13(b)는 이를 집속이온빔장치를 통하여 제작한 구조이다[27]. 디지털 패턴의

장점은 각 픽셀의 체류 시간을 선택적으로 정의할 수 있다는 것이다[35]. 픽셀이 흰색에 가까울수록 빔의 체류 시간이 길고, 반대로 검은색에 가까울수록 빔의 체류 시간은 감소한다. 순수한 검정색에서는 빔의 주사가 이루어지지 않는다. 빔의 체류 시간이 긴 영역일수록 집속이온빔장치의 밀링은 더욱 깊숙이 이루어지고, 이로 인하여 그림 2.13과 같은 3차원의 복잡한 구조 제작이 가능하다.

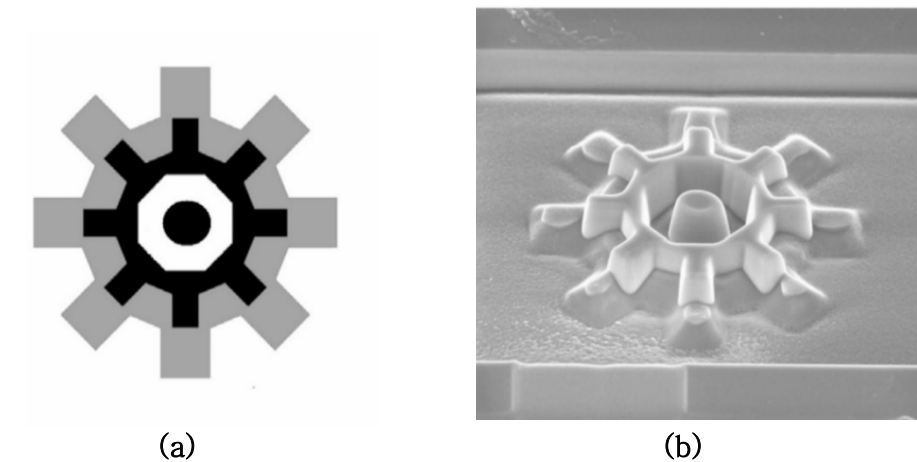


그림 2.13 집속이온빔장치에 그레이스케일을 활용하여 제작한 예시



## 제 3 장 결과와 해석

### 3.1 원뿔형 완전 광 흡수체의 구조 및 특성

#### 3.1.1 구조 및 개요

본 논문에서는 다층박막 구조의 다양한 공진 모드를 통해 광대역 완전 광 흡수를 얻기 위하여 다층박막의 주기적 원뿔 형태 구조를 제안하였다. 다층박막을 형성하는 금속과 유전체는 공정 과정에서의 박막 간 밀착력을 고려하여 각각 Al과  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 사용하였다. 원뿔 형태 구조를 사용함으로써 단위 구조 내의 편광 방향 의존성을 제하고, 이를 그림 3.1과 같이 육각 구조로 배열하여 주기적 배열에서 발생하는 편광 방향 의존성을 최소화하도록 설계하였다.

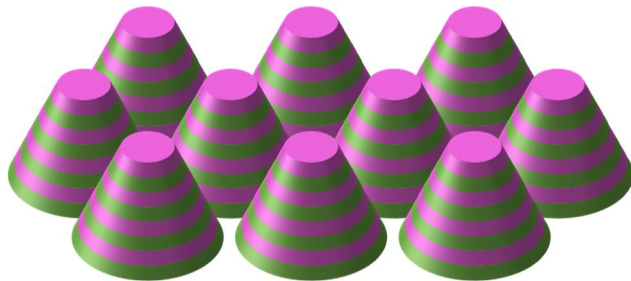


그림 3.1 원뿔형 완전 광 흡수체 모식도

설계된 완전 광 흡수체는 두께가 450nm인 Au 반사판 위에 Al과  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 20nm씩 교대로 증착한 구조이다. 박막 층의 수는 모두 10 쌍으로 전체 높이는 반사판을 포함하여 850nm 이다. 각 층의 두께가 완전 광 흡수 대역인 가시광선과 근적외선 파장의 1/20 이하이므로 유효 매질 이론을 적용할 수 있으며 쌍곡 메타물질로 해석이 가능하다. 쌍곡 메타물질 도파로 구조의 완전 광 흡수 주파수는 도파로의 폭에 의존하므로 원뿔의 상단과 하단 폭에 따라 완전 광 흡수 대역폭이 결정된다.

### 3.1.2 광 흡수율의 수치해석

본 논문에서는 수치해석 도구로서 유한요소법(Finite Element Method)을 사용하였다. 수치해석에 사용되는 Au, Al,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 물성값인 유전함수는 [38, 39]를 참조하였다. 그림 3.1과 같이 다층박막의 원뿔 구조를 육각형으로 배열한 후 선형 편광된 빛이 수직 입사할 때의 전자장의 분포를 분석하여, 가시광선에서 적외선에 해당하는 파장인 400nm~2500nm에서 광 흡수율을 계산하였다. 이때, 광 흡수율은 입사된 빛의 에너지와 금속 층에서 손실된 열에너지의 비율로 정의되었다.

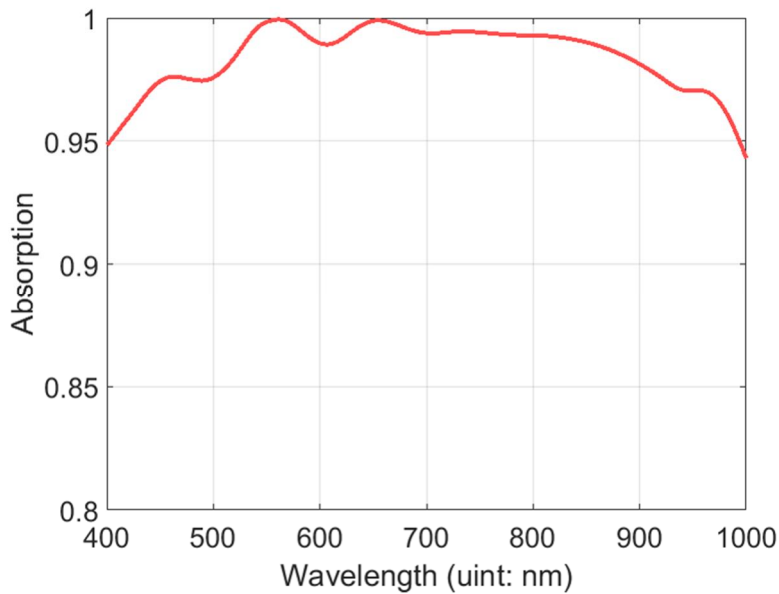


그림 3.2 원뿔형 다층박막 구조체의 광 흡수 스펙트럼

그림 3.2는 원뿔형 다층박막 구조체의 광 흡수율을 나타낸 그래프이다. 상단과 하단 폭을 각각 20nm와 200nm, 하단 간격을 50nm로 설계할 경우 가시광선 영역을 포함한 400nm~1000nm에서 95%이상의 광대역 광 흡수를 보였다. 이러한 광대역의 광 흡수 현상은 원뿔형 구조체의 연속적 공진주파수 특성에 기인한다. 그림 3.3은 광 흡수 스펙트럼에서 400nm, 600nm, 800nm에 해당하는 자기장의 세기 분포를 나타낸 것으로서, 연속적 공진 현상이 각각 다른 위치에서 발생함을 보여준다. 원뿔의 폭이 넓어질수록 더 낮은 주파수에서 공진을 일으키며, 따라서 긴 파장의 빛을 흡수한다.

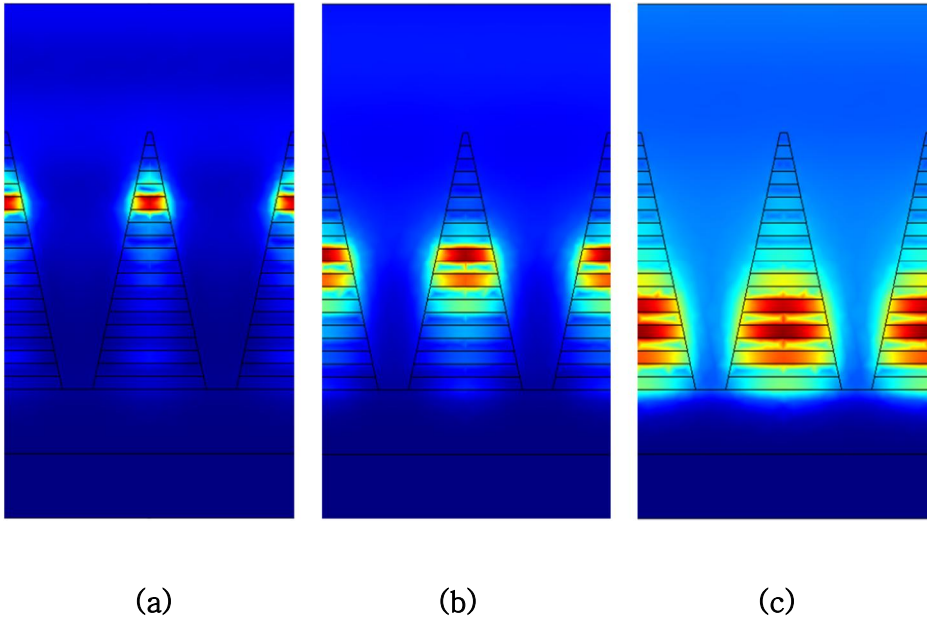
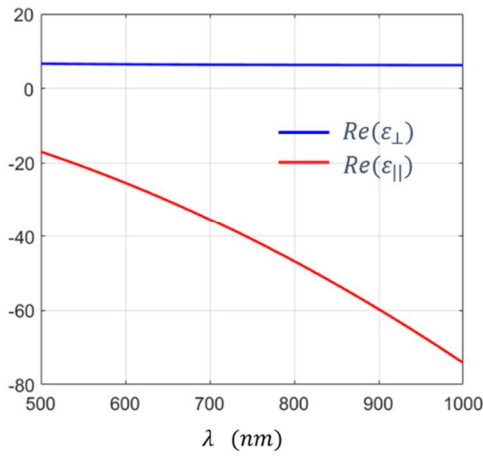
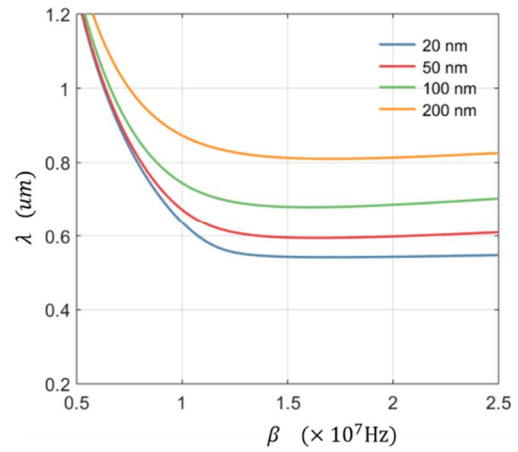


그림 3.3 파장 변화에 따른 자기장 세기 분포 (a)400nm (b)600nm (c)800nm

이러한 광대역 광 흡수 특성이 느린 빛 현상에 기인하는 것을 설명하기 위하여 제안된 구조에서 각 방향의 유효 유전율을 구하면 그림 3.4(a)와 같다. 그래프에서 나타나듯이 각 방향 유효 유전율 실수부의 부호가 다르므로 쌍곡 메타물질로서 해석될 수 있다. 이에 따라 분산 관계식을 구하면 그림 3.4(b)와 같이 얻어진다. 도파로의 폭을 20nm에서 200nm까지 점진적으로 증가시킴에 따라 느린 빛 모드가 형성되는 주파수가 500nm에서 800nm까지 변하며 이를 통해 해당 주파수 대역에서 나타나는 광대역의 광 흡수 특성을 설명할 수 있다.



(a)



(b)

그림 3.4 (a) Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 다층 박막 구조의 유효 유전율  
(b) 다층 박막 도파로의 폭 길이 변화에 따른 분산 관계

하지만, 원뿔의 상단 폭을 20nm 로 제작하는 것에 어려움이 존재하기 때문에 이를 고려하여 상단 폭을 100nm로 설계하고, 하단 폭을 200nm, 300nm, 400nm 로 변화시키며 광 흡수율을 재해석하였다. 그림 3.4는 계산된 광 흡수율을 원뿔의 하단 폭에 따라 비교하고 있다. 하단 폭이 증가함에 따라 더 긴 파장의 공진 모드가 발생하므로 광 흡수 대역이 저주파수 영역으로 확장된다.

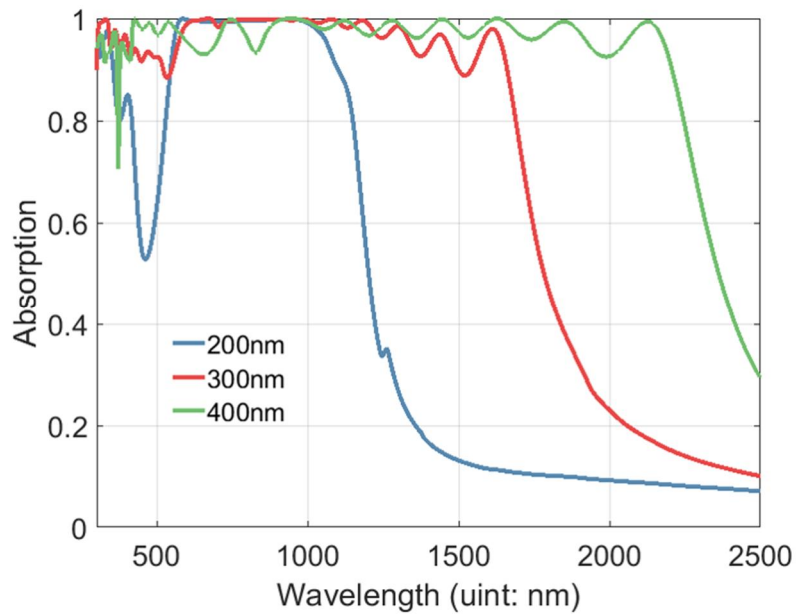


그림 3.4 원뿔 하단 폭 변화에 따른 광 흡수 스펙트럼

하단 폭이 200nm인 경우 공진 주파수에 해당하는 600nm~1000nm의 파장 대역에서 95% 이상의 고른 흡수율을 보이거나, 하단 폭이 300nm, 400nm인 경우 공진이 발생하는 파장 대역에서 흡수율의 변동이 나타남을 확인할 수 있다. 이는 상단 폭과 하단 폭의 차이가 증가함에 따라 점진적 변화로 해석 가능한 범위를 벗어나기 때문이다.

### 3.2 원뿔형 완전 광 흡수체 제작

다층박막의 원뿔형 구조의 완전 광 흡수체를 재현 하기 위한 모식도가 그림 3.5에 단계별로 나타나있다. 금(Au)을 충분한 두께로 증착하고 얇은 두께의 유전체( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )와 금속(Al)을 반복적으로 증착한 후 집속이온빔장치를 이용하여 원뿔형의 구조체를 구현하게 된다.

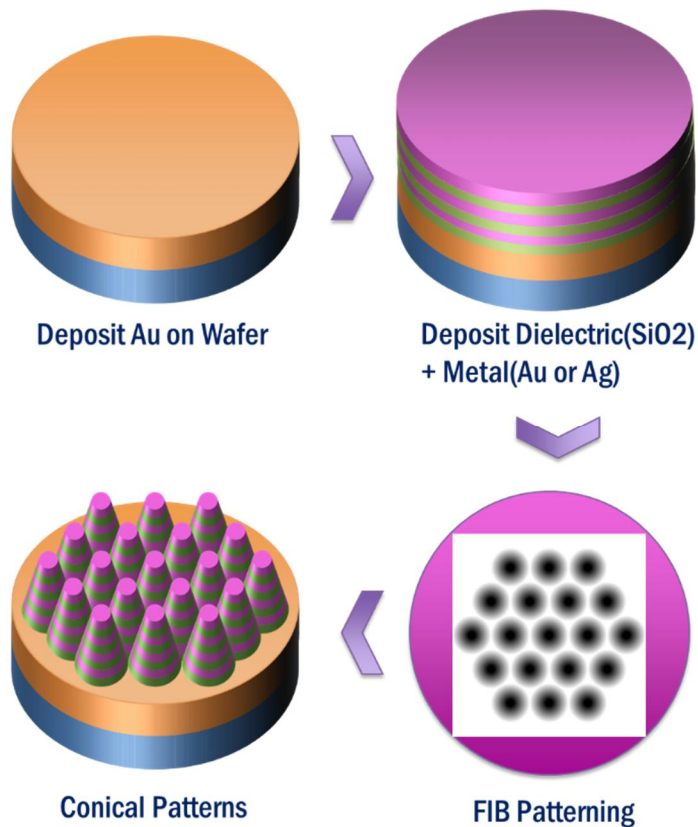


그림 3.5 다층박막의 원뿔형 완전 광 흡수체 구현을 위한 단계별 모식도

### 3.2.1 다층박막구조

그림 3.6 (a)는 유전체( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )와 금속( $\text{Al}$ )의 반복 증착 조건을 확립하기 위하여 그림 3.6 (b)의 모식도처럼 증착을 진행한 후 촬영한 주사형 전자 현미경(Scanning Electron Microscope: SEM)의 이미지이다.

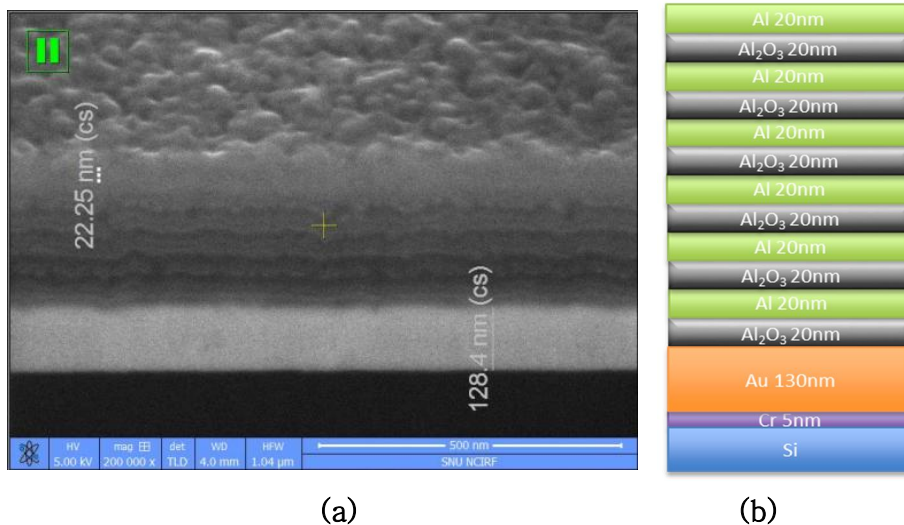
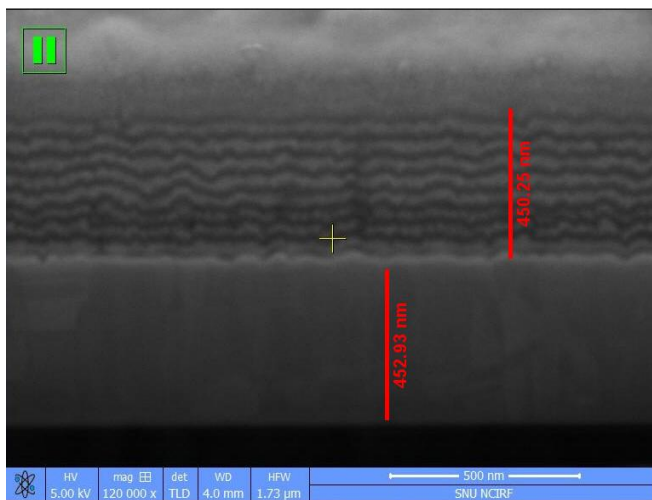


그림 3.6 실리콘(Si) 웨이퍼 위에 증착된 금(Au) 반사판과 6쌍의 유전체( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )/금속(Al) 박막

실리콘(Si) 웨이퍼 위에 Thermal Evaporator를 사용하여 접착력 증대를 위한 크롬(Cr) 박막을 5nm 증착하고 같은 방법으로 금(Au)를 130nm를 증착하였다. 그 후  $\text{Ar}^+$  플라즈마를 이용하는



Sputter 장비를 사용하여  $\text{Al}_2\text{O}_3$  박막을 증착하고, 이어서 Thermal Evaporator를 사용하여 Al 박막을 반복적으로 증착하였다. 그림 3.6 (a)는 마지막 Al 박막의 증착이 완료된 후 100시간 이상 대기 중에 노출된 후 촬영된 이미지인데, 맨 위의 층에서 산화가 진행된 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 각 층의 박막증착 공정이 완료된 후 다음 박막증착 공정이 진행되기 까지 대기중의 노출 시간을 최소화 하여야 한다는 결론을 얻게 되었다. 이를 토대로 하여 그림 3.7 (b)와 같이 10쌍의 유전체( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )/ 금속(Al)을 증착하였다. 다만 후속공정이 진행되면서 금(Au) 반사판이 전부 소진되는 것을 방지하기 위해 목표



(a)



(b)

그림 3.7 실리콘(Si) 웨이퍼 위에 증착된 금(Au) 반사판과 10쌍의 유전체( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )/금속(Al) 박막

두께를 450nm로 증대하여 공정을 진행하였다.

더불어 맨 위의 층이  $\text{Al}_2\text{O}_3$  일 경우가 Al 경우보다 막질의 보호가 뛰어나  $\text{Al}_2\text{O}_3$  박막으로 맨 위층의 공정을 마감하였고 이를 그림 3.7 (a)에서 확인할 수 있다. 금(Au) 반사판 위로 각 20nm의 박막층이 총 21번 증착되었고 총 두께는 450nm로 각층의 평균 공정오차는 1.4nm 이다.

### 3.2.2 전하 중화제와 그레이스케일(Grayscale)이미지를 활용한 원뿔형 구조 제작

다층박막을 형성한 후에 집속이온빔장치를 활용하여 원뿔형 구조를 제작하게 된다. 이때 그레이스케일 이미지를 활용함으로써 집속이온빔의 체류시간을 세분화하여 원뿔의 기울기를 구현할 수 있다.

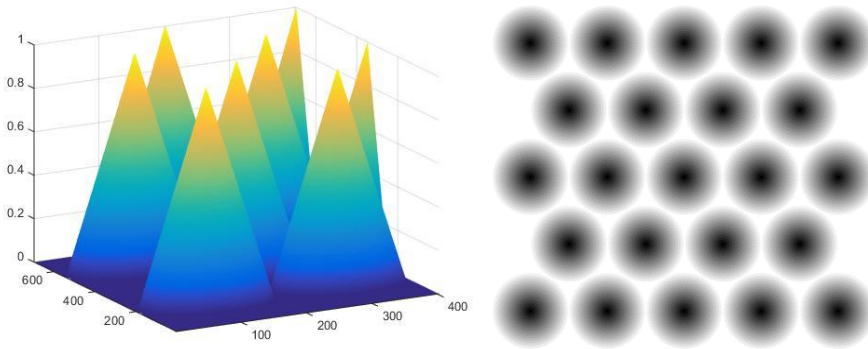


그림 3.8 원뿔 구조와 일치하는 그레이스케일 이미지

그림 3.8은 구현하고자 하는 원뿔 구조와 일치하는 그레이스케일 이미지를 제작한 것이다. 하지만 이것을 바탕으로 집속이온빔을 활용하여 구조를 제작할 경우, 앞서 서술한 이온 빔의 드리프트 현상이 일어나게 되고 전하 중화제를 활성화 하더라도 완벽한 보완이 이루어지지 않기 때문에 완벽한 원뿔형 구조를 구현할 수 없다.

그림 3.9는 전하 중화제를 활성화 하지 않고 집속이온빔 밀링을 시도한 후 촬영한 이미지이다. 원뿔의 형태가 대칭적이지 않게 밀링된 것을 확인 할 수 있다.

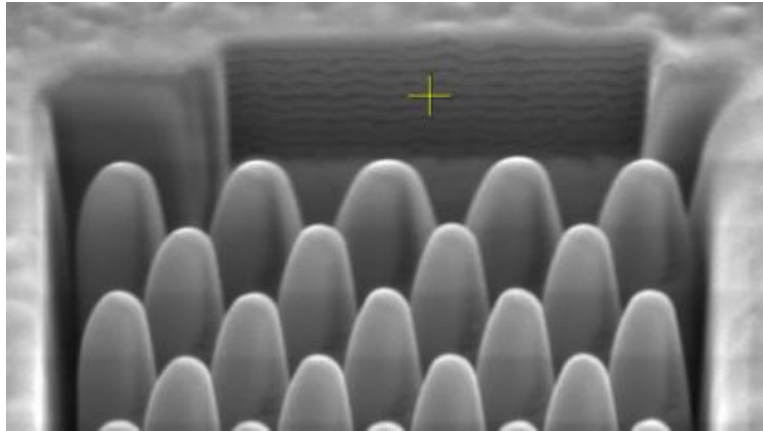


그림 3.9 전하 중화제를 활성화 하지 않고 집속이온빔장치를 통해 구현된 원뿔 구조

그림 3.10은 그림 3.8의 그레이스케일 이미지를 이용하여 구현한 구조를 촬영한 것이다. 원뿔들의 중심부영역에 이온 빔의 체류시간이 길어 전체적인 높이가 현저히 낮아지고, 원뿔형 구조의 구현이 이루어지지 않은 것을 관찰할 수 있다. 이로 인하여 실제 제작하고자 하는 구조체와 그와 상응하는 그레이스케일 이미지는 차이가 있을 수 있음을 확인하였다.

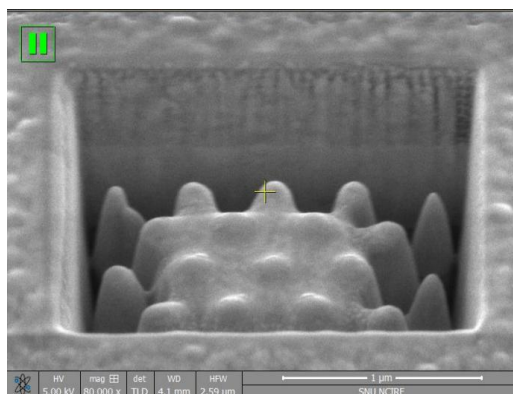


그림 3.10 원뿔구조와 일치하는 그레이스케일 이미지를 활용한 밀링

이를 바탕으로 하여 원뿔의 중심부 영역에서 빔의 체류시간을 줄이고 실제 원뿔의 모양과 비슷한 형태를 구현하기 위하여 그림 3.11 과 같은 그레이스케일 이미지를 제작하였고 그림 3.12는 이를 활용하여 집속이온빔장치에서 제작한 구조를 촬영한 것이다. 이는

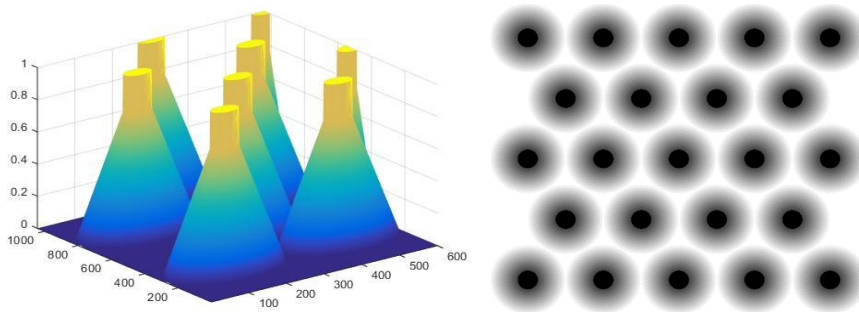


그림 3.11 원뿔 중심부의 이온 빔 체류시간을 줄이는  
그레이스케일 이미지

그림 3.10과 비교하였을 때 원뿔의 형태가 향상된 것을 확인할 수 있다.

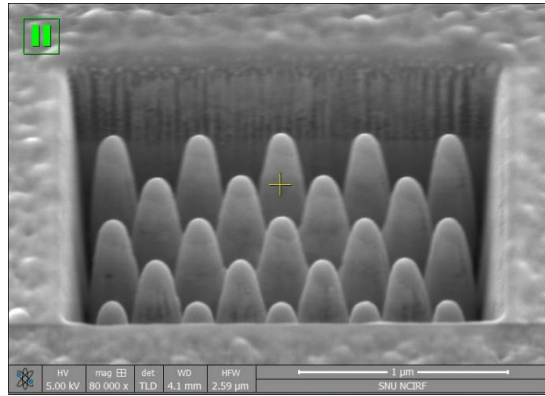


그림 3.12 원뿔 중심부의 이온 빔 체류시간을 줄이는 그레이스케일 이미지를 활용한 밀링

하지만 이러한 그레이스케일의 경우 원뿔 중심부의 작은 원의 경계에서부터 이온 빔의 체류시간이 급격하게 증가하는 단점이

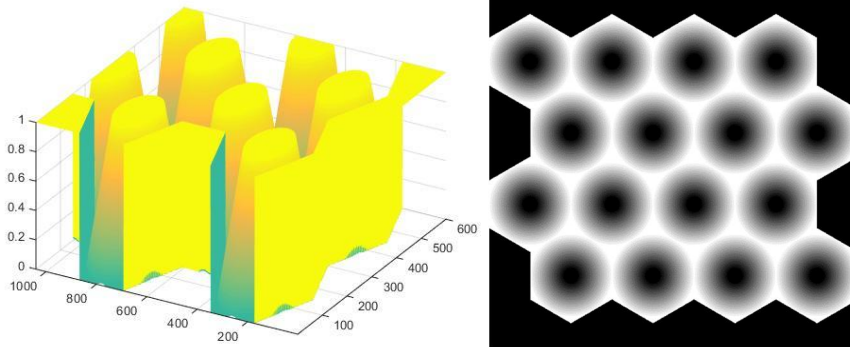


그림 3.13 이온 빔 체류시간을 연속적으로 설계하고 대면적 구현을 위한 퍼즐형 그레이스케일 이미지

있기에 그림 3.13과 같이 원뿔 중심부의 작은 원의 경계부터

연속적으로 (continuous) 이온 빔의 체류시간이 증가하도록 설계함과 동시에 패턴을 이어 붙일 수 있도록 퍼즐형식으로 제작하여 대면적 구현에 용이하도록 하였다.

### 3.2.3 공정 결과

그림 3.13의 그레이스케일 이미지를 집속이온빔장치에서 활용하여 구현한 것이 그림 3.14이고, 같은 방식으로 오른쪽에 이어 붙이기를 통하여 그림 3.15를 구현하였는데, 이어 붙여진 경계 부분의 원뿔들이 비대해진 것을 확인할 수 있다 (타원). 이는 원뿔형 구조를 이어 붙여서 제작할 때, 이온 빔에 의하여 깎여 나온 다층박막의 잔여 물질이 제작 완료된 원뿔에 달라 붙으면서 발생하게 된다.

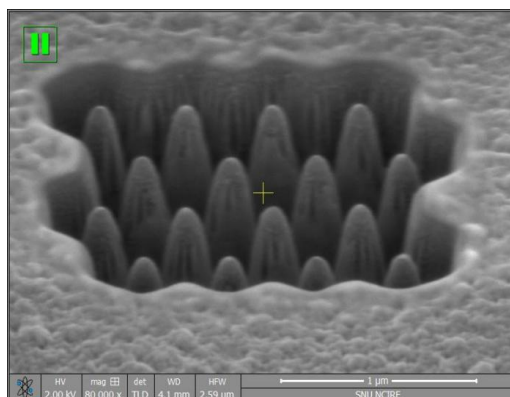


그림 3.14 퍼즐형 그레이스케일 이미지를 활용한 밀링

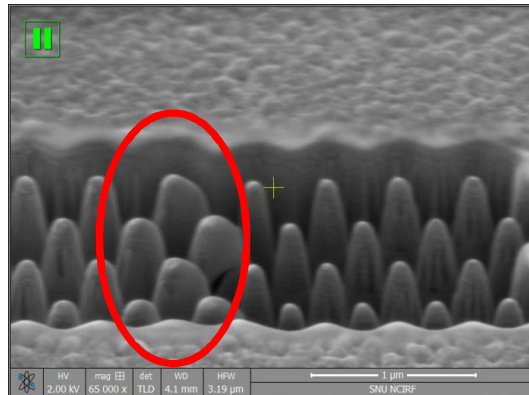


그림 3.15 순차적 밀링 시 잔여 물질에 의해 비대해진 경계의 원뿔

이를 통하여 경계면에서의 실험적인 오차를 피하기 어렵다고 판단하여, 단위 격자에 최대한 많은 수의 원뿔 구조를 포함하여 집속이온빔 밀링을 시도하였으나, 그림 3.16과 같이 특정 개수 이상의 구조물이 단일 격자에 포함되게 되면 이는 해상도와 밀링의 정확성을 현저히 저하시킨다. 이로 인하여 집속이온빔으로 밀링시에 이에 해당하는 이온 빔의 확대율 또한 증대한 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

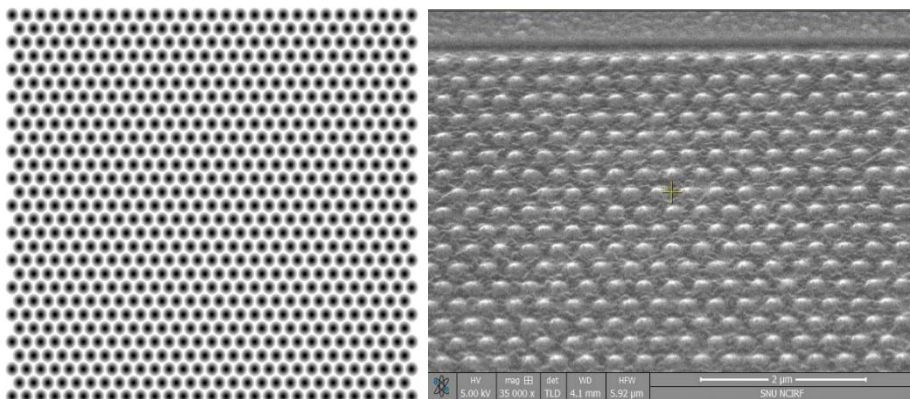


그림 3.16 특정 개수 이상의 구조물이 단일 격자에 포함되어 발생하는 해상도의 저하와 밀링의 부정확성



이를 토대로 가능한 많은 수의 원뿔 구조를 단위 격자에 포함 시킴과 동시에 실험 오차를 줄이기 위하여 원뿔 구조물의 개수를 차츰 줄여가며 집속이온빔장치를 시험해 보았으며, 조건을 최적화 하였다. 이는 그림 3.17 (b)에서 확인할 수 있으며 8 x 8 개의 원뿔을 단위 격자로 설계하고 이온 빔 밀링으로 구현하였다. 원뿔의 상단 폭은 110nm, 하단 폭은 300nm, 하단 폭의 간격은 120nm에 근접하며 이를 반영하여 수치해석을 수행한 결과는 그림 3.18과 같이 나타난다.

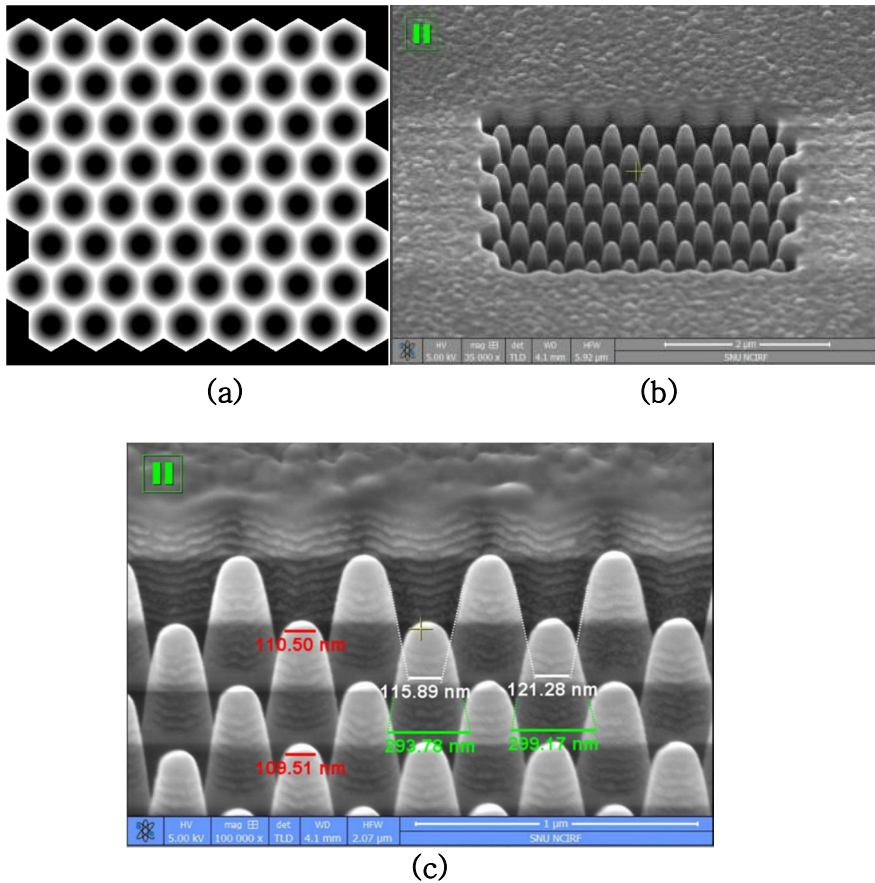


그림 3.17 (a)최적화된 8 x 8 개의 원뿔 단위 격자 그레이스케일 이미지 (b)상응하는 집속이온빔 밀링 결과 (c)확대 이미지

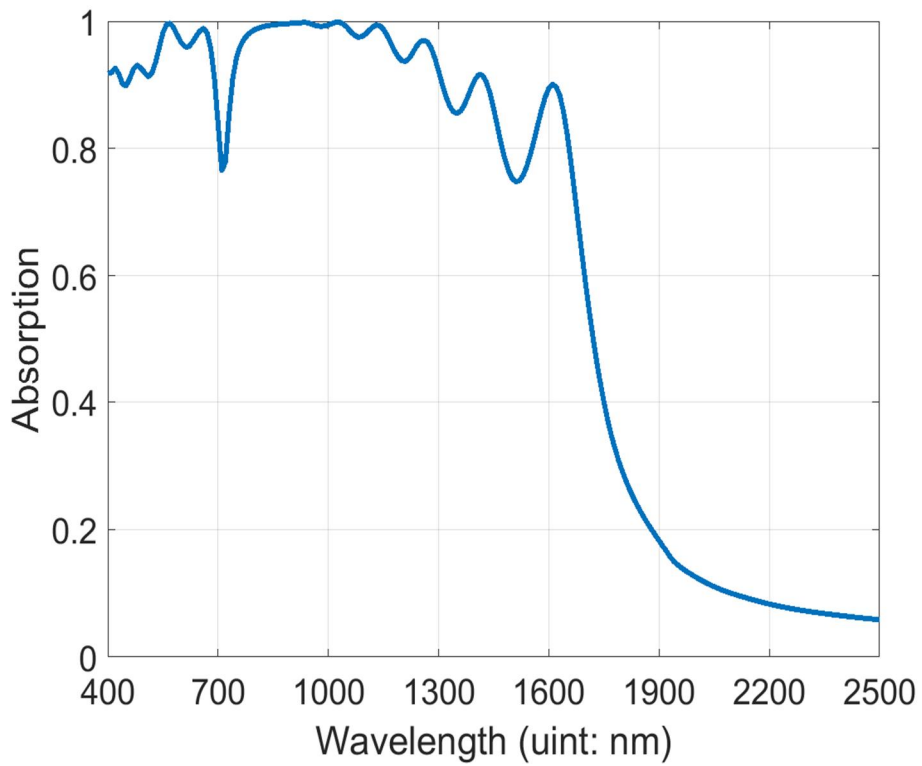
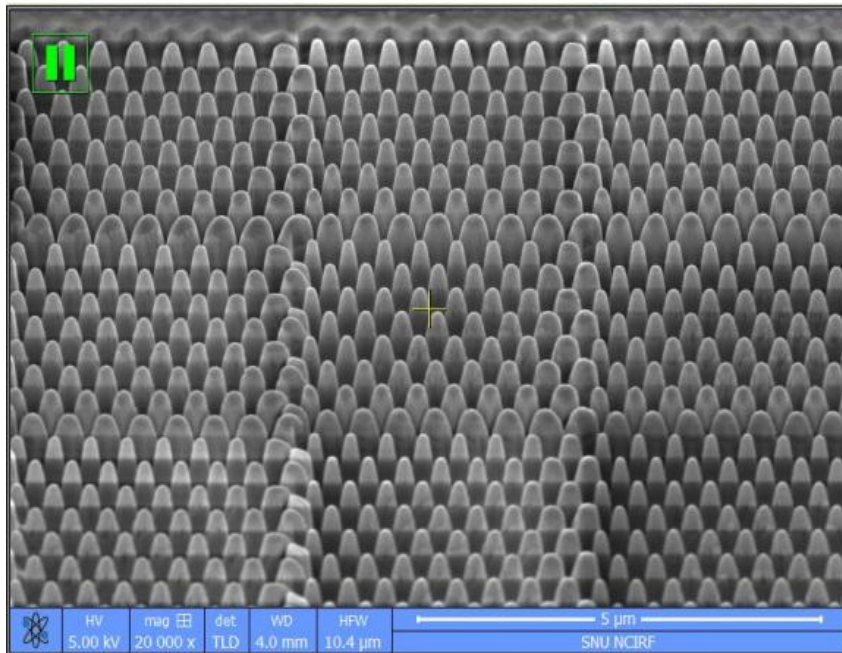
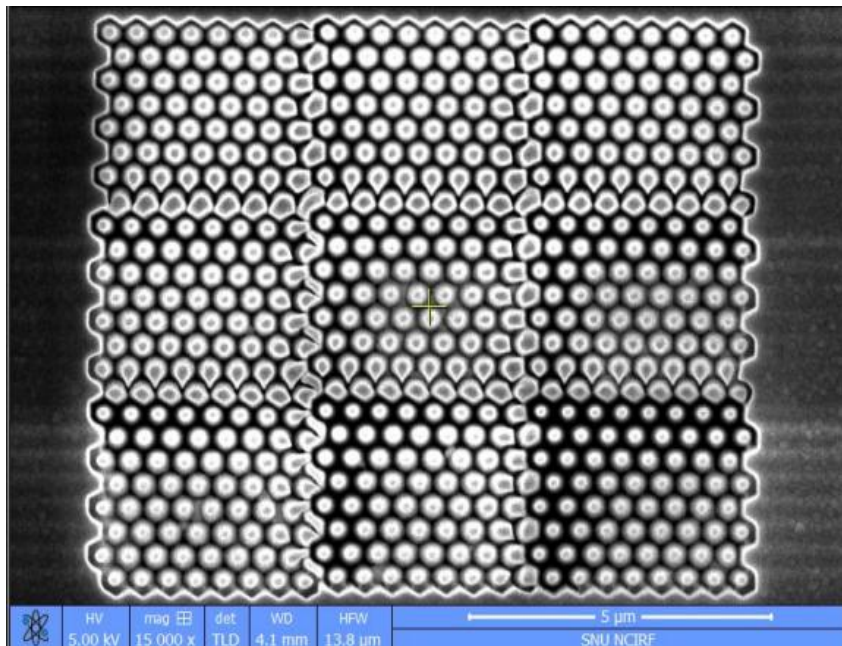


그림 3.18 제작된 구조의 수치해석 결과

단위 격자 총 9개 (가로 3, 세로 3)를 이어 붙여 그림 3.19을 최종적으로 구현하였다.



(a)



(b)

그림 3.19 8 x 8 개의 원뿔 단위 격자 9개를 구현 후 수직으로부터  
(a)40° (b)0° 에서 촬영한 SEM 이미지

## 제 4 장 결 론

본 논문에서는 광대역 완전 광 흡수를 위한 다층박막 구조체를 제안하고 이를 구현하였다. 광대역의 흡수 폭을 얻기 위하여 연속적 공진 주파수를 갖는 원뿔형 다층박막 구조체를 제안하고 유한요소법을 이용한 수치해석으로 원뿔의 상단 폭 20nm와 하단 폭 200nm의 경우 400nm~1000nm의 파장 대역에서 95% 이상의 광 흡수가 나타남을 확인하였다. 또한 원뿔의 상단 및 하단 폭을 조절함으로써 광 흡수 대역을 제어할 수 있음을 입증하였다. 하지만 제작의 용이를 위하여 상단 폭을 100nm로, 하단 폭을 200nm, 300nm, 400nm로 재설계하여 광 흡수율을 분석한 결과 하단 폭이 증가함에 따라 낮은 주파수의 공진 모드가 발생하므로 광 흡수 대역이 장파장 영역으로 확장되었다. 이를 제작하기 위하여 Au 450nm의 반사판 위에 금속(Al 20nm)과 유전체 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  20nm)의 박막 10 쌍을 증착하고 집속이온빔장치를 사용하여 원뿔형 패턴을 구현하였다. 제작된 구조체의 폭과 간격을 반영한 수치해석 결과 대부분의 가시광 영역에서 90%이상의 광 흡수율을 보였다.

## 참고 문헌

1. Ra'di, Y., C.R. Simovski, and S.A. Tretyakov, *Thin Perfect Absorbers for Electromagnetic Waves: Theory, Design, and Realizations*. Physical Review Applied, 2015. **3**(3).
2. Aydin, K., et al., *Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers*. Nat Commun, 2011. **2**: p. 517.
3. He, S. and T. Chen, *Broadband THz Absorbers With Graphene-Based Anisotropic Metamaterial Films*. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2013. **3**(6): p. 757-763.
4. Tao, H., et al., *A dual band terahertz metamaterial absorber*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010. **43**(22): p. 225102.
5. Liu, N., et al., *Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor*. Nano Lett, 2010. **10**(7): p. 2342-8.
6. Liu, X., et al., *Infrared spatial and frequency selective metamaterial with near-unity absorbance*. Phys Rev Lett, 2010. **104**(20): p. 207403.
7. Hu, C., et al., *Realizing near-perfect absorption at visible frequencies*. Optics express, 2009. **17**(13): p. 11039-11044.
8. Hedayati, M.K., et al., *Design of a perfect black absorber at visible frequencies using plasmonic metamaterials*. Adv Mater, 2011. **23**(45): p. 5410-4.
9. Rosfjord, K.M., et al., *Nanowire single-photon detector with an integrated optical cavity and anti-reflection coating*. Optics express, 2006. **14**(2): p. 527-534.
10. Aydin, K., et al., *Investigation of magnetic resonances for different split-ring resonator parameters and designs*. New journal of physics, 2005. **7**(1): p. 168.
11. Shen, X., et al., *Polarization-independent wide-angle triple-band metamaterial absorber*. Optics express, 2011. **19**(10): p. 9401-9407.
12. Zhu, B., et al., *Polarization insensitive metamaterial absorber with wide incident angle*. Progress In Electromagnetics Research, 2010. **101**: p. 231-239.
13. Li, M., et al., *Perfect metamaterial absorber with dual bands*. Progress In Electromagnetics Research, 2010. **108**: p. 37-49.
14. Alici, K.B., et al., *Optically thin composite resonant absorber at the near-infrared band: a polarization independent and spectrally broadband configuration*. Optics express, 2011. **19**(15): p. 14260-14267.

15. Cui, Y., et al., *Ultrabroadband light absorption by a sawtooth anisotropic metamaterial slab*. Nano letters, 2012. **12**(3): p. 1443–1447.
16. Neira, A.D., G.A. Wurtz, and A.V. Zayats, *Superluminal and stopped light due to mode coupling in confined hyperbolic metamaterial waveguides*. Scientific reports, 2015. **5**.
17. Zhou, J., et al., *Experiment and theory of the broadband absorption by a tapered hyperbolic metamaterial array*. ACS Photonics, 2014. **1**(7): p. 618–624.
18. Stewart, D.K., A.F. Doyle, and J.D. Casey Jr. *Focused ion beam deposition of new materials: dielectric films for device modification and mask repair, and tantalum films for x-ray mask repair*. in *SPIE's 1995 Symposium on Microlithography*. 1995. International Society for Optics and Photonics.
19. Ward, B.W., et al. *Microcircuit modification using focused ion beams*. in *Medical Imaging II*. 1988. International Society for Optics and Photonics.
20. Athas, G.J., et al. *Focused ion-beam system for automated MEMS prototyping and processing*. in *Micromachining and Microfabrication*. 1997. International Society for Optics and Photonics.
21. Rephaeli, E. and S. Fan, *Absorber and emitter for solar thermophotovoltaic systems to achieve efficiency exceeding the Shockley-Queisser limit*. Optics express, 2009. **17**(17): p. 15145–15159.
22. Munday, J.N. and H.A. Atwater, *Large integrated absorption enhancement in plasmonic solar cells by combining metallic gratings and antireflection coatings*. Nano letters, 2010. **11**(6): p. 2195–2201.
23. Farhat, M., et al., *Mirror-backed dark alumina: A nearly perfect absorber for thermoelectronics and thermophotovoltaics*. Scientific reports, 2016. **6**.
24. Diem, M., T. Koschny, and C.M. Soukoulis, *Wide-angle perfect absorber/thermal emitter in the terahertz regime*. Physical Review B, 2009. **79**(3).
25. Liu, X., et al., *Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters*. Phys Rev Lett, 2011. **107**(4): p. 045901.
26. Foley, J.J., et al., *Design of emitter structures based on resonant perfect absorption for thermophotovoltaic applications*. Optics express, 2015. **23**(24): p. A1373–A1387.
27. Tittl, A., et al., *Palladium-based plasmonic perfect absorber in the visible wavelength range and its application to hydrogen*

- sensing. *Nano letters*, 2011. **11**(10): p. 4366–4369.
28. Bagheri, S., et al., *Large-Area Low-Cost Plasmonic Perfect Absorber Chemical Sensor Fabricated by Laser Interference Lithography*. *Acs Sensors*, 2016. **1**(9): p. 1148–1154.
29. Baba, T., *Slow light in photonic crystals*. *Nature photonics*, 2008. **2**(8): p. 465–473.
30. Li, B., Y. He, and S. He, *Investigation of light trapping effect in hyperbolic metamaterial slow-light waveguides*. *Applied Physics Express*, 2015. **8**(8): p. 082601.
31. Wirth, R., *Focused Ion Beam (FIB)*. *European Journal of Mineralogy*, 2004. **16**(6): p. 863–876.
32. Reyntjens, S. and R. Puers, *A review of focused ion beam applications in microsystem technology*. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2001. **11**(4): p. 287.
33. Langford, R. and A. Petford-Long, *Preparation of transmission electron microscopy cross-section specimens using focused ion beam milling*. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2001. **19**(5): p. 2186–2193.
34. Gatzen, H.H., V. Saile, and J. Leuthold, *Micro and Nano Fabrication*. 2015: Springer.
35. Anzalone, P.A., J.F. Mansfield, and L.A. Giannuzzi, *DualBeam Milling and Deposition of Complex Structures Using Bitmap Files and Digital Patterning*. *Microscopy and Microanalysis*, 2004. **10**(S02): p. 1154.
36. Jantou, V., et al., *Focused ion beam milling and ultramicrotomy of mineralised ivory dentine for analytical transmission electron microscopy*. *Micron*, 2009. **40**(4): p. 495–501.
37. Stevie, F., L. Giannuzzi, and B. Prenitzer, *The focused ion beam instrument*, in *Introduction to Focused Ion Beams*. 2005, Springer. p. 1–12.
38. Malitson, I. and M. Dodge. *Refractive-index and birefringence of synthetic sapphire*. in *Journal Of The Optical Society Of America*. 1972. AMER INST PHYSICS CIRCULATION FULFILLMENT DIV, 500 SUNNYSIDE BLVD, WOODBURY, NY 11797–2999.
39. Palik, E.D., *Handbook of optical constants of solids*. Vol. 3. 1998: Academic press.

# Abstract

## Implementation of Multilayered Nano-structure for Broadband Perfect Light Absorption

Hyunwoo Cho

Dept. of Electrical and Computer Engineering

The Graduate School

Seoul National University

The perfect light absorber, theoretically absorbing 100% of light by suppressing the transmission and reflection of incident light has attracted much attention due to its potential for use in solar cells, selective thermal emitters, sensors and detectors. In the early stage, several perfect light absorbers based on resonator have been proposed using coupling with surface plasmon polariton, waveguide mode, and cavity containing absorbing material, while the narrow bandwidth of absorption was unavoidable. On the other hand, the recently proposed metamaterial-based perfect light absorber has optical properties that are not present in the nature through



subwavelength periodic arrangement, so that the broadband light absorption is achievable by adjusting the structural parameters.

In this study, I proposed a cone-shaped hyperbolic metamaterial structure as a broadband polarization-independent perfect light absorber. Since the hyperbolic metamaterial has characteristics of the metal and the dielectric according to the direction, a slow light mode appears at a specific frequency due to extraordinary eigenmode. By adopting a conical shape, it is possible to broaden the bandwidth that forms the slow light mode, thereby obtaining the broadband light absorption. In order to realize such a conical three-dimensional structure, focused ion beam was used, and the ion beam dwell time was controlled by using a grayscale image.

**Keywords : Perfect Light Absorber, Focused Ion Beam**

Student Number : 2015-22811